Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 3, Fall 2023, p. 285-301

The Effect of Foliar Application of Silicon, Calcium, and Potassium Fertilizers on Yield and Some of the Agronomic and Physicomechanical Traits of *Hordeum Vulgare*

R. Nodehi[1], M. Baradaran firozabadi[2], H. Mirzaee moghaddam[3*], A. Gholami[2]

Received: 1 December 2022 Revised: 06 February 2023 Accepted: 14 February 2023	**How to cite this article:** Nodehi, R., Baradaran firozabadi, M., Mirzaee moghaddam, H., & Gholami, A. (2023). The Effect of Foliar Application of Silicon, Calcium, and Potassium Fertilizers on Yield and Some of the Agronomic and Physicomechanical Traits of *Hordeum Vulgare*. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(3), 285-301. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.80010.1208

Introduction

Food security is one of the basic needs of any society. Studies have been conducted on the foliar application of elements, especially silicon, calcium, and potassium, to reduce the adverse environmental effects on the physico-mechanical properties of cereals and improve their growth and development in order to maintain food security. Lodging, which is caused by a decrease in the mechanical properties of the plant stem's flexural strength, is characterized by bending or fracture that changes the angle of the grain stem from the vertical position. Due to the important factors involved, an important aspect of performance is directly and indirectly related to the occurrence of fungal diseases and nutrient-related issues affecting the physico-mechanical properties of the plant, such as flexural strength. The efficacy of silicon, calcium, and potassium in addressing these concerns is notable.

Materials and Methods

This research was conducted at the research farm of the Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology, located in Bastam. The seeds of the Reyhan cultivar, a high-yielding and early spring-type barley plant suitable for regions with mild winters and short springs, were used in this study. Planting operations followed agricultural principles, and irrigation was carried out using atmospheric and ridge methods. The first irrigation took place after planting, and subsequent irrigations were performed at eight-day intervals. Harvesting was done manually at the end of the growing period, specifically 115 days after planting.

The experiment followed a factorial design and utilized a randomized complete block design with three replications. On July 11 (115 days after planting), a harvest sample measuring 50 cm^2 was taken from each experimental plot, accounting for the margins, to determine the yield.

For the barley stem bending test, a three-point bending test was conducted using a material testing machine. The probe applied a loading speed of 5 $mm.min^{-1}$. A specially designed jaw was used for the barley stem cutting test, taking into consideration the characteristics of the barley plant. The incision test was performed on the second median, and the loading speed was set at 20 $mm.min^{-1}$.

Results and Discussion

The main axial stem serves as a storage organ, supporting the filling grains through stock re-transference. A desirable trait is having a higher dry weight in the stem. Among the treatments, foliar application of 6 mM calcium chloride, along with sodium silicate at all three levels and spraying with 12 mM silicon at concentrations of 150 and 300 $mg.L^{-1}$, showed statistically superior results.

1- PhD Student, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3- Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
(*- Corresponding Author Email: hosseinsg@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.80010.1208

Stem diameter is an important attribute related to plant strength, stability, resistance to lodging, and certain fungal diseases. The control plants had a stem diameter of 2.63 mm, which significantly improved with the treatment compounds. Barley stem wall thickness increased significantly with both 150 and 300 $mg.L^{-1}$ levels of calcium chloride, combined with all three levels of sodium silicate spraying. These factors play a role in determining the ultimate photosynthetic destination, as well as the efficiency and economic production of the target seed cultivar or crop.

The results indicated a significant increase in grain yield when simultaneously applying 10 $mg.kg^{-1}$ silicon with 6 mM calcium chloride, showing a 65% improvement compared to the control. Treatment with three potassium sulfate variations, combined with either 6 or 12 mM calcium chloride, or 12 mM calcium chloride alone, enhanced the flexural strength of the stem by 75%, 60%, and 62%, respectively. Among the treatment compounds studied, the shear strength of barley stems ranged from 2.63 MPa to 5.43 MPa. Plants treated with sodium silicate at concentrations of both 150 and 30 $ml.L^{-1}$, in conjunction with 6 mM calcium chloride foliar application, exhibited higher shear strength compared to other treatments.

Conclusion

This study demonstrated the tripartite effect of the treatments. The treatment composition derived from a surface area of 300 $ml.L^{-1}$ of sodium, combined with 6 and 12 mM calcium chloride without potassium sulfate, had the greatest impact on flexural strength and stem diameter.

Keywords: Calcium chloride, Cutting test, Potassium sulfate, Sodium silicate, Yield

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۲، ص ۳۰۱-۲۸۵

اثر محلول‌پاشی کودهای سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم بر عملکرد، برخی خواص زراعی و فیزیکومکانیکی گیاه جو

راضیه نودهی[۱]، مهدی برادران فیروز آبادی[۲]، حسین میرزایی مقدم[۳*]، احمد غلامی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

چکیده

امنیت غذایی یکی از نیازهای اساسی هر جامعه است که هرگز نمی‌توان آن را نادیده گرفت. امروزه پژوهش‌هایی درخصوص محلول‌پاشی عناصر به‌ویژه سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم برای کاهش اثرات نامطلوب محیطی بر خواص فیزیکومکانیکی غلات و بهبود رشد و عملکرد آن‌ها در جهت نیل به حفظ امنیت غذایی صورت گرفته است. در پژوهش حاضر برای مطالعه‌ی تأثیر محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف عناصر سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم بر خصوصیات فیزیکومکانیکی گیاه جو آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و بر پایه‌ی طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل محلول‌پاشی سیلیسیم از منبع سیلیکات سدیم در سه سطح صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان عامل اول، کلسیم از منبع کلرید کلسیم در سه سطح صفر، ۶ و ۱۲ میلی‌مولار به‌عنوان عامل دوم و پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم در دو سطح صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان عامل سوم بودند. محلول‌پاشی با غلظت‌های مورد نظر قبل از گل‌دهی انجام شد. آزمون خمش ساقه جو با استفاده از دستگاه آزمون مواد، آزمون خمش سه نقطه‌ای و آزمون برش با استفاده از فک مخصوص با سرعت بارگذاری ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نتایج نشان داد افزایش عملکرد دانه جو حاصل از کاربرد همزمان سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر با کلریدکلسیم ۶ میلی‌مولار معادل ۶۵ درصد نسبت به شاهد بود. همچنین محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم موجب بهبود صفاتی از قبیل قطر ساقه و مقاومت برشی ساقه نسبت به شاهد گردید. برهم‌کنش سیلیکات سدیم ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر و سولفات پتاسیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نیز مقاومت خمشی ساقه را به‌طور متوسط ۶۵ درصد افزایش داد. به‌طور کلی در محدوده‌ی آزمایش انجام شده، سیلیکات سدیم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر و کلرید کلسیم ۱۲ میلی‌مولار تأثیر بیشتری بر صفات مورد بررسی داشتند.

واژه‌های کلیدی: سولفات پتاسیم، سیلیکات سدیم، عملکرد، کلرید کلسیم، مقاومت خمش و برشی

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) از خانواده گندمیان، گیاهی علفی، تک‌لپه، یک‌ساله و یکی از غلات دانه ریز مهم است. طی سال‌های گذشته تولید جهانی این غله بیش از ۱۴۰ میلیون تن گزارش شده است. طوری که بر اساس آمار رسمی سازمان خواروبار جهانی (FAO, 2020) ایران با ۳/۶ میلیون تن تولید در سال در جایگاه سیزدهم قرار گرفت. جو ازجمله کم‌توقع‌ترین گیاهان زراعی است که دامنه‌ی سازگاری و پراکنش آن از سایر گیاهان زراعی گسترده‌تر بوده و یکی از گیاهان زراعی متحمل نسبت به شوری و خشکی است (Emam, 2013). با توجه به این‌که گیاه جو بعد از گندم، برنج و ذرت مهم‌ترین ماده غذایی در جهان است (Emam, 2013) و از آن در تغذیه انسان و دام استفاده می‌شود، تولید آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Khodabande, 2014). جو هم مانند سایر گیاهان خانواده گندمیان، مراحل رشد مختلفی دارد که زمان هر مرحله تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد. مطالعات مختلف نشان داده است که خواص فیزیکومکانیکی اجزای گیاهان متأثر از عواملی مثل شرایط محیطی در دوره رشد (نور، دما، خاک، آبیاری و میزان کوددهی)، رطوبت محصول در زمان برداشت و شرایط نگهداری پس از برداشت می‌باشد (Porabolghasem & Ghazanfari Moghadam, 2021).

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲- دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۳- استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hosseinsg@yahoo.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.80010.1208

کوددهی یکی از عوامل مؤثر بر خواص فیزیکومکانیکی گیاه است که در نهایت بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارد. از میان روش‌های موجود کوددهی به‌ویژه برای عناصر میکروالمنت، کوددهی برگی قابل‌قبول‌تر است چون مقادیر کمتر عناصر غذایی برای مصرف سریع به‌وسیله گیاه، فراهم می‌شود (Stapper & Fisher, 1990). کوددهی برگی عبارت از محلول‌پاشی عناصر غذایی روی برگ‌ها و ساقه‌های گیاه و جذب آن‌ها از این مکان‌هاست (Jafardokht, Mousvinik, Mehraban, & Basiri, 2015). کاربرد کوددهی برگی می‌تواند دسترسی گیاهان به عناصر غذایی را برای به‌دست آوردن عملکرد بالا، تضمین کند (Stapper & Fisher, 1990) البته زیاده‌روی در مصرف کود یا هر نهاده‌ی دیگری می‌تواند مخاطراتی مانند ورس را در غلات در پی داشته باشد.

ورس یا خوابیدگی که ناشی از کاهش ویژگی مکانیکی مقاومت خمشی ساقه گیاه می‌باشد، به خمش و یا شکست ساختاری گفته می‌شود که موجب تغییر زاویه ساقه غلات از حالت عمودی شده است (Pinthus, 1974). با توجه به بررسی‌های انجام شده ورس عامل مهمی در کاهش عملکرد (به‌طور مستقیم و غیرمستقیم با بروز بیماری‌های قارچی و مشکلات برداشت) می‌باشد (Asadi, Haqqania, Lekzian, & Mafotun, 2013). به‌طورکلی معمول‌ترین و آشکارترین پاسخ‌های گیاهان به تنش‌های مکانیکی کاهش خواص فیزیکی گیاه از جمله ارتفاع ساقه، سطح برگ، قطر ساقه و کاهش وزن تر و خشک می‌باشد (Anten, Casado-Garcia, Pierik, & Pons, 2006). بسیاری از گیاهان زراعی ازجمله گندم و جو به‌طور ویژه به خوابیدگی ناشی از باد حساسیت دارند. حساسیت به خوابیدگی در جو از گندم هم بیشتر است و پس از یولاف حساس‌ترین غله به خوابیدگی است (Emam, 2013). خوابیدگی مانع از جریان آب و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و مانع از انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه‌ها یا دانه‌های درحال توسعه می‌شود که در نتیجه آن پر شدن دانه‌ها مختل می‌شوند (Kashiwagi, Sasaki, & Ishimaru, 2005). از میان عناصر غذایی که با خواص فیزیکومکانیکی گیاه مانند افزایش مقاومت خمشی ارتباط دارند، می‌توان سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم را نام برد (Asadi *et al.*, 2013). مطالعات ما (Ma, 2010) نشان داد که سیلیس نقش مهمی در مقاومت به تنش‌های محیطی دارد. ذخیره سیلیس به شکل ژل سیلیکا در ساقه غلات سبب بهبود خواص فیزیکومکانیکی ساقه گیاه و با افزایش مقاومت خمشی آن‌ها، موجب کاهش ورس خواهد شد. در پژوهشی سیلیس موجب استحکام و ضخیم‌تر شدن ساقه گل ژربرا (*Gerbera hybrid* L.) شد (Mam Rashpour & Nazari Deljoo, 2019). مام‌رش‌پور و همکاران (Mom rashpour, Nazari deljoo, & Haghshenas, 2018) اثرات سیلیسیم در غلظت‌های مختلف را بر رشد دانه، تولید ماده خشک و تغذیه معدنی لوبیای چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata*) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سیلیسیم در مقادیر کم به‌طور معنی‌داری خواص فیزیکی گیاه از جمله تعداد دانه، وزن تر و خشک دانه، عملکرد نسبی ریشه و ساقه را افزایش داد. همچنین تحقیقات نشان داده است که محلول‌پاشی کلسیم نتایج مناسبی در بهبود استحکام سلول گیاهی دارد و به‌طورکلی، رشد طولی ریشه و شاخه‌ها و مقاومت اندام‌های گیاهی را در برابر صدمات مکانیکی، شکستگی، آفات و بیماری‌ها افزایش می‌دهد (Asadi nasab, Nabipour, Roshanfekr, & Rahnama Qahfarkhi, 2019). مطابق تحقیقات معدنی‌پور و همکاران (Madanipour, Asilan, & Mansourifar, 2017)، کاربرد کلسیم از طریق افزایش شاخص سبزینگی، محتوای نسبی آب، سطح برگ و زیست‌توده تولیدی موجب افزایش عملکرد دانه سویا (*Glycine max*) شد. نتایج سایر تحقیقات نیز نقش مثبت کلسیم را در بهبود خواص فیزیکی و اجزای عملکرد محصولات گلرنگ (*Carthamus tinctorius*)، سویا و آفتابگردان (*Helianthus annuus*) تأیید کرده‌است (Ibrahim, Faisal, & Shehata, 2016; Jamshidi, Baradarane firooz abadi, Olumi, & Naqavi, 2016). گیاهان به دلیل اثر مثبت کلسیم بر فراهمی و جذب عناصر غذایی می‌توانند تعداد و سطح برگ بوته را افزایش دهند که این امر منجر به دریافت بیشتر نور برای فتوسنتز می‌شود. این اثر مثبت کلسیم در افزایش سطح برگ به نقش این عنصر غذایی در تقسیم و توسعه سلولی نسبت داده شده است (Khalifa, Omaima, & Abd-El-Khair, 2009). عنصر پتاسیم، به‌عنوان عنصر کیفیت در گیاهان مطرح است و جزء عناصر ضروری به‌شمار می‌رود که بعد از نیتروژن پرمصرف‌ترین عنصر مورد نیاز گیاهان است. به دلایل مختلفی همچون، نوع و میزان رس‌های خاک، مقدار ماده آلی، آبشویی و غیره میزان پتاسیم قابل‌جذب در خاک برای رشد بهینه گیاهان کافی نمی‌باشد و نیاز به تأمین پتاسیم برای تولید انبوه ضروری به نظر می‌رسد (Sedghi & Seyd sharifi, 2013). پتاسیم دارای نقش‌های مهمی در گیاه است که به‌عنوان مثال می‌توان به افزایش مقاومت گیاهان در برابر سرمازدگی، آفات، بیماری‌ها و شوری، افزایش راندمان آبیاری و بازدهی کود نیتروژن، افزایش خاصیت انبارداری به‌خصوص در گل‌های زینتی، افزایش غلظت کلروفیل و عمل کربن‌گیری در گیاه، بهبود خواص فیزیکومکانیکی گیاه، افزایش تعداد و قطر دسته‌های آوندی و در نتیجه افزایش تعرق گیاه و افزایش مقاومت خمشی و کاهش ورس، تشکیل و انتقال نشاسته، قند و چربی‌ها، ساخت پروتئین‌ها، متابولیسم گیاه و تعادل بار الکتریکی غشاهای سلولی و فعال سازی آنزیم‌ها اشاره نمود (Mehdinjad, Jamalpour, Fakheri, & Khajeh, 2019). صدیقی و همکاران (Siddiqui, Al-Whaibi, Sakran, Basalah, & Ali, 2012) گزارش کردند محلول‌پاشی پتاسیم موجب افزایش

درصد دانه‌های پر و وزن دانه می‌شود.

با توجه به مزایایی که برای عناصر سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم ذکر شد، تأثیر استفاده از کودهای حاوی این عناصر به‌صورت محلول‌پاشی، بر برخی خواص زراعی مانند وزن خشک ساقه و غلاف برگ و به‌خصوص عملکرد، همچنین تأثیری که بر خواص فیزیکومکانیکی مانند مقاومت خمش و برش ساقه گیاه جو که ارتباط مستقیمی با مقاومت ساقه نسبت به خمیدگی ناشی از ورس دارد مورد بررسی و به‌عنوان هدف این پژوهش در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل اجرای پژوهش، بذر و خاک مزرعه آزمایشی

این پژوهش، در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود، واقع در شهر بسطام (در طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۶۶ متر از سطح دریا) در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ اجرا شد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۱۵۴ میلی‌متر، متوسط حداقل و حداکثر دمای سالیانه آن به‌ترتیب ۹/۶- و ۳۹ درجه سانتی‌گراد و از لحاظ اقلیمی جزء مناطق سرد و خشک به‌شمار می‌رود. در این پژوهش از بذرهای گیاه جو تیپ بهاره رقم ریحان استفاده شد. این رقم پرمحصول و زودرس و مناسب برای مناطقی با زمستان ملایم و بهار کوتاه می‌باشد. متوسط عملکرد آن در آزمایش‌های مختلف ۷ تا ۸ تن در هکتار گزارش شده است و حداکثر عملکرد ۱۰ تا ۱۱ تن در هکتار ثبت شده است. ارتفاع رقم ریحان متوسط و تا ۹۰ سانتی‌متر گزارش شده است (Qazvini, Yousefi, & Saeedi, 2002). به‌منظور تعیین بافت خاک، وضعیت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و تشخیص خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش، قبل از انجام عملیات آماده‌سازی و اجرای طرح، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در سه نقطه مختلف در هر نمونه‌گیری صورت گرفت. سپس نمونه‌های خاک با هم مخلوط و در نهایت یک نمونه یک کیلوگرمی به‌عنوان نماینده تمام سطح مزرعه به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج به‌دست آمده در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق اطلاعات کسب‌شده بافت خاک لومی رسی تعیین شد.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک محل آزمایش

Table 1- Soil characteristics of the test site

پارامترهای اندازه‌گیری‌شده Parameters was measured	واحد Unit	مقدار Amount
Sand	Percentage	20.2
Clay	Percentage	30.7
Organic carbon	Percentage	0.4
Nitrogen	Percentage	0.1
Potassium	ppm	280
Phosphorus	ppm	10
Electrical conductivity	$dS.m^{-1}$	1.5
The acidity of the saturated extract	-	7.8

کاشت بذرها در تاریخ ۲۴ و ۲۵ اسفند ماه به‌صورت دستی در عمق دو تا سه سانتی‌متری صورت گرفت، آزمایش در کل شامل ۵۴ کرت بود. در هر کرت آزمایشی ۱۰ خط کاشت به طول چهار متر با فاصله بین ردیف ۳۰ سانتی‌متر و روی ردیف یک سانتی‌متر قرارگرفت. شش ردیف وسط جهت اعمال تیمارها و اندازه‌گیری صفات استفاده شد. قابل ذکر است که هیچ‌گونه کودی قبل از کاشت به زمین داده نشد. عملیات داشت در طی فصل رشد به‌صورت مداوم انجام پذیرفت. به دلیل تعداد بسیار کم علف‌های هرز موجود در کرت‌های آزمایشی، وجین به‌صورت دستی انجام شد و مزرعه تا پایان دوره رشد عاری از علف‌های هرز بود. هیچ‌گونه بیماری و حشره‌ای که آفت جو باشد در مزرعه مشاهده نشد، بنابراین به مبارزه شیمیایی نیازی نبود. آبیاری مزرعه به روش جوی و پشته و اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت و آبیاری‌های بعدی هر هشت روز یک بار انجام شد و در نهایت در پایان دوره رشد (۱۱۵ روز پس از کاشت)، برداشت به‌صورت دستی صورت گرفت.

مشخصات تیمارها و طرح آزمایشی

آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه‌ی بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌ها شامل محلول‌پاشی عناصر سیلیسیم از منبع سیلیکات سدیم در سه سطح صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان عامل اول، کلسیم از منبع کلرید کلسیم (دارای ۳۶ درصد کلسیم) در سه سطح صفر، ۶ و ۱۲ میلی‌مولار به‌عنوان عامل دوم و پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم (دارای ۴۴/۸۳ درصد پتاسیم) در دو سطح صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر

به‌عنوان عامل سوم بودند. محلول‌پاشی سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم با غلظت‌های مورد نظر طی یک مرحله، قبل از گلدهی، متقارن با ۵۵ روز پس از کاشت، هنگام غروب و در هوای ملایم انجام شد به‌طوری که برگ‌ها کاملاً خیس شدند. سیلیکات سدیم دارای ۲۲/۹۴ درصد سیلیسیم و ۳۳/۹۷ درصد سدیم، کلرید کلسیم دارای ۳۶ درصد کلسیم و ۶۴ درصد کلرید و سولفات پتاسیم دارای ۴۴/۸۳ درصد پتاسیم و ۵۵/۱۷ درصد گوگرد بود. در مجموع در هر تکرار ۱۸ ترکیب تیماری وجود داشت.

بین ۱۰ تا ۶۰ روز پس از محلول‌پاشی نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری صفات مختلف انجام گردیده که نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری مقاومت برش و خمشی ساقه حدود ۵۵ روز بعد از محلول‌پاشی بود. بوته‌ها پس از حذف اثر حاشیه به‌نحوی انتخاب می‌شدند که بتوانند تا حد زیادی خصوصیات کرت مربوطه را نشان دهند. بوته‌های مورد نظر از سطح خاک و از ناحیه طوقه قطع و به آزمایشگاه منتقل شدند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت پذیرفت.

اندازه‌گیری خواص فیزیکومکانیکی گیاه جو

قطر ساقه گیاه جو

قطر قسمت پایینی ساقه جو (میان‌گره اول) که مقطع عرضی دایره‌ای دارد با استفاده از کولیس دیجیتال روی ۱۰ بوته اندازه‌گیری و سپس میانگین آن‌ها محاسبه شد.

وزن خشک ساقه و غلاف برگ

از بین ویژگی‌های وابسته به رشد، میزان ماده خشک تولیدشده به دلیل اهمیت بیشتر به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده در عملکرد محسوب می‌شود (Kouchaki & Khajeh Hosseini, 2017). وزن خشک کمتر بوته، حاکی از توانایی کمتر گیاه در استفاده از عوامل محیطی است (Emam, 2013) که خود نتیجه افت فرآیندهای فیزیولوژیکی نظیر فتوسنتز می‌باشد (Khajeh pur, 2011). به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک بوته‌ها در زمان پر شدن کامل سنبله، ۵ بوته به‌عنوان نمونه از هر کرت برداشته شد و در آزمایشگاه به چهار بخش برگ، ساقه، غلاف برگ و سنبله تفکیک شدند. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و در نهایت با ترازوی حساس به دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند. مقادیر به‌دست آمده بر حسب گرم در مترمربع محاسبه گردید.

عملکرد

در تاریخ ۲۰ تیر (۱۱۵ روز پس از کاشت) از هر کرت آزمایشی ۵۰ سانتی‌مترمربع با در نظر گرفتن حاشیه و به‌منظور تعیین عملکرد برداشت گردید. عملکرد بر حسب کیلوگرم در هکتار برآورد گردید.

ویژگی‌های مکانیکی ساقه گیاه جو

برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی جو نمونه‌برداری از ساقه جو ۱۱۰ روز پس از کاشت و پس از رسیدگی فیزیولوژیک، به‌طور دقیق و با ایجاد کم‌ترین فشار نسبت به ساقه انجام گردید و پس از کدگذاری، به‌منظور جلوگیری از صدمات ناشی از جابه‌جایی، نمونه‌ها مانند شکل ۱-a درون استوانه‌های طلقی از پیش ساخته شده قرار داده شدند. از هر ترکیب تیماری تعداد ۱۰ نمونه جهت انجام آزمایش‌های مربوط به خواص مکانیکی استفاده شد. بدین‌منظور، قطر ساقه و ضخامت دیواره ساقه در میان‌گره اول و دوم هر نمونه به‌وسیله‌ی کولیس دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین قطر داخلی ساقه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$d' = d - 2t \qquad (۱)$$

که در آن d': قطر داخلی ساقه (mm)، d: قطر خارجی (mm) و t: ضخامت ساقه (mm) می‌باشد.

برای انجام دو آزمون خمش سه نقطه‌ای و برش که در ادامه آمده است، از دستگاه آزمون مواد (STM 20) ساخت شرکت سنتام ایران استفاده شد.

مقاومت خمشی ساقه گیاه جو

برای آزمون خمش ساقه جو با استفاده از دستگاه آزمون مواد، آزمون خمش سه نقطه‌ای انجام شد. بدین منظور، مطابق شکل ۱-b، پروبی با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه در دمای محیط، در وسط ساقه جو که روی دو تکیه‌گاه قرار داده شده بود تا نقطه شکست ساقه بارگذاری شد. برای این آزمایش از میان‌گره اول ساقه جو استفاده شد. سپس با استفاده از روابط (۲) و (۳) میزان مقاومت خمشی هر نمونه محاسبه گردید.

$$I = \frac{\pi}{4}\left(c^4 - (c-t)^4\right) \qquad (۲)$$

$$\sigma = \frac{Fcl}{4I} \qquad (۳)$$

که در این رابطه‌ها، I: گشتاور لختی یا همان گشتاور دوم سطح مقطع ساقه (mm^4)، c: شعاع خارجی مقطع عرضی ساقه (mm)، t: متوسط ضخامت دیواره ساقه (mm)، σ: مقاومت خمشی ساقه (MPa)، F: نیروی خمش (N) و l: فاصله بین دو تکیه‌گاه ثابت (mm) می‌باشد (Crook & Ennos, 1995).



(a) (b)

شکل ۱- a: استوانه‌های طلقی حاوی نمونه، b: آزمون خمش ۳ نقطه‌ای

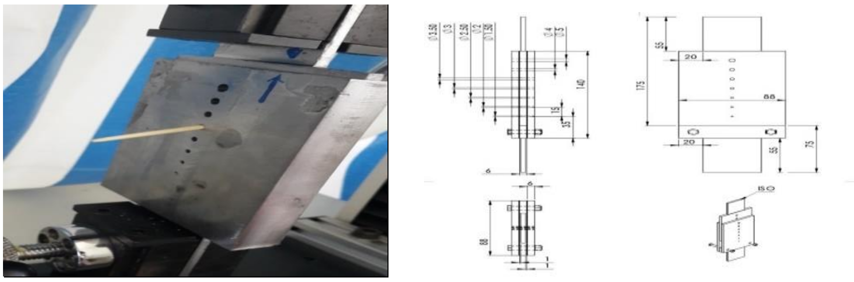
Figure 1- a: Folding cylinders containing the sample, b: 3- Point bending test

مقاومت برشی ساقه گیاه جو

برای انجام آزمون برش ساقه گیاه جو، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است با توجه به ویژگی‌های گیاه جو، فکی مخصوص طراحی ۲-a و ساخته۲-b شد. آزمایش برش روی میان‌گره دوم انجام شد. سرعت بارگذاری ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه تعیین شد و میزان مقاومت برشی ساقه جو با استفاده از رابطه (۴) محاسبه گردید.

$$\tau = \frac{F}{2A} \qquad (۴)$$

که در این رابطه، τ: مقاومت برشی ساقه (MPa)، F: نیروی برش در نقطه شکست (N) و A: مساحت مقطع عرضی دیواره ساقه (mm^2) می‌باشد (Gere & Timoshenko, 1997).



(a) (b)

شکل ۲- a: طرحواره فک آزمون برش، b: فک ساخته‌شده، متصل به دستگاه آزمون مواد

Figure 2- a: Scheme of cutting test jaw, b: Made of the jaw, connected to the material testing machine

نتایج و بحث

ماده خشک ساقه

ساقه یکی از محورهای اصلی ذخیره است که می‌تواند دانه‌های در حال پر شدن را از طریق انتقال مجدد ذخایر حمایت کند (Sharbatkhari, Shobbar, Galeshi, & Nakhoda, 2016). لذا وزن خشک بیشتر ساقه می‌تواند صفتی مطلوب باشد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر اصلی کلریدکلسیم در سطح احتمال ۵ درصد و برهم‌کنش سیلیکات سدیم با کلرید کلسیم و سیلیکات سدیم با سولفات پتاسیم و نیز اثر سه‌جانبه تیمارها بر وزن خشک ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که محلول‌پاشی کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار در هر سه سطح سیلیکات سدیم و محلول‌پاشی این ماده با غلظت ۱۲ میلی‌مولار همراه با سیلیکات سدیم ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در سطح آماری برتر قرار گرفتند. بیشترین افزایش مشاهده شده نسبت به شاهد مربوط به سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر و کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار بود که ۶۶/۸۱ درصد بیشتر از شاهد بود.

در گیاهانی که به‌تنهایی با سولفات پتاسیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر یا با سیلیکات سدیم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر محلول‌پاشی شده بودند. وزن خشک ساقه حدود ۸۶۵ گرم در مترمربع به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۴۲ درصد افزایش داشت که البته با محلول‌پاشی

سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر و سولفات پتاسیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر در یک گروه آماری قرارگرفتند. همچنین نتایج نشان داد که اگر سیلیکات سدیم به‌تنهایی استفاده شود تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر از لحاظ تأثیرگذاری بر وزن خشک ساقه وجود نخواهد داشت (شکل ۴). افزایش وزن خشک ساقه تحت تأثیر سیلیسیم و پتاسیم می‌تواند به دلیل افزایش سرعت فتوسنتز و رشد گیاه باشد (Ju, Wang, & Chen, 2020) و کاهش وزن خشک ساقه علی‌رغم افزایش غلظت سیلیسیم از ۱۵۰میلی‌گرم به ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در حضور ۲۰ میلی‌گرم پتاسیم احتمالا به دلیل ایجاد سمیت جزئی عناصر در تقابل با یکدیگر باشد.

مقایسه ترکیب‌های تیماری سه‌جانبه نشان داد که کاربرد توأم سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر، کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار و سولفات پتاسیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار بالاتری از وزن خشک ساقه را نسبت به سایر تیمارها دارا بود که البته با تعدادی از ترکیبات تیماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). مامرش‌پور و همکاران (MamRashpour *et al.*, 2018) اثرات سیلیسیم در غلظت‌های مختلف را بر رشد دانه، تولید ماده خشک و تغذیه معدنی لوبیای چشم‌بلبلی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سیلیسیم در مقادیر کم به‌طور معنی‌داری تعداد دانه، وزن تر و خشک ریشه و ساقه را افزایش داد. همچنین طی آزمایشی در سورگوم (*Sorghum bicolor Moench*) مصرف پتاسیم بالاترین وزن خشک ساقه (۱۰۸/۲۲ گرم در بوته) را نشان داده است (Sadeghi Lotfabadi, Kafi, & Khazai, 2011). همین‌طور بر اساس پژوهش احمد (Ahmad, 2014) بیشترین وزن خشک بوته گندم با استفاده توأم ۲میلی‌مول در لیتر سیلیکون و ۰/۵ میلی‌مول در لیتر نیترات پتاسیم به‌دست آمد. همچنین در پژوهش گونگ و همکاران (Gong, Zhu, Chen, Wang, & Zhang, 2005) مشاهده شد مکمل سیلیکون از طریق افزایش فتوسنتز موجب افزایش وزن خشک بوته در گیاهان جو و برنج شد.

وزن خشک غلاف برگ

از بین منابع تغییر فقط اثر سه‌جانبه تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۲). وزن خشک غلاف برگ در گیاهان شاهد ۷۵/۱۷ گرم در مترمربع به‌دست آمد. این مقدار با اعمال ترکیبات تیماری مختلف بین ۲۶ تا ۱۸۰ درصد بهبود یافت. بیشترین اثر مربوط به ترکیب تیماری سه‌جانبه سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر بدون حضور کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم بود که ۱۸۰ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد که البته با تعدادی از ترکیبات تیماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). غلاف برگ بخشی از قاعده برگ است که در استحکام ساقه و مقاومت آن در برابر خوابیدگی نقش دارد (Nomura *et al.*, 2022).

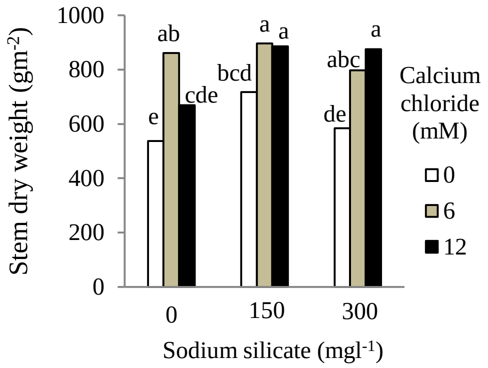
جدول ۲- میانگین مربعات ماده خشک در ساقه و غلاف، قطر ساقه، ضخامت دیواره ساقه و عملکرد جو تحت تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم

Table 2– Mean squares of dry matter in stem and Sheath, stem diameter, thickness of the stem wall and yield affected by sodium silicate, calcium chloride and potassium sulfate foliar application

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	ماده خشک ساقه Stem dry matter	ماده خشک غلاف Sheath dry matter	قطر ساقه Stem diameter	ضخامت دیواره ساقه Stem wall thickness	عملکرد دانه Grain yield
تکرار Repetition	2	42375.82	317.34	0.01	0.014	80749.86
سیلیکات سدیم (a) Sodium silicate	2	2907.52	754.07	0.14**	0.0014	94920.52
کلرید کلسیم (b) Calcium chloride	2	292802.53*	642.17	0.095**	0.02**	49999.48
سولفات پتاسیم (c) Potassium sulfate	1	31795.72	2695.39	0010	0.003	26781.37
a×b	4	77485.44**	2747.03	0.05**	0.012**	121240.05*
a×c	2	235251.88**	2075.76	0.17**	0.0018	213002.02*
b×c	2	25182.07	1192.66	0.009	0.0027	10170.26
a×b×c	4	586139.99**	9444.01**	0.33**	0.0059	92041.04
Errorخطا	34	16650.30	1047.33	0.009	0.0026	40542.75
ضریب تغییرات CV (%)		1.00	22.82	3.39	13.48	19.17

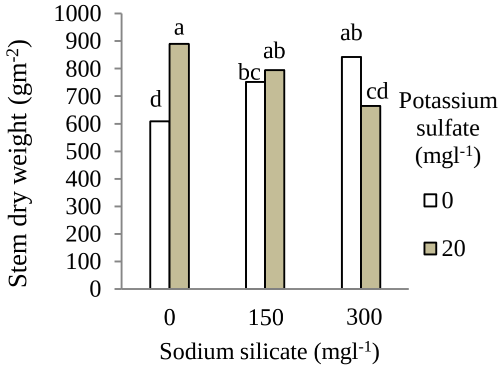
* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

* and ** are significant at the probability level of 5% and 1%, respectively



شکل ۳- اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم بر وزن خشک ساقه

Figure 3- The effect of sodium silicate and calcium chloride foliar application on stem dry weight



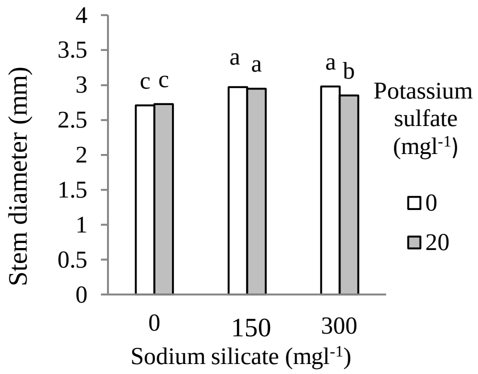
شکل ٤- اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و سولفات پتاسیم بر وزن خشک ساقه

Figure 4- The effect of sodium silicate and potassium sulfate foliar application on stem dry weight

قطر ساقه

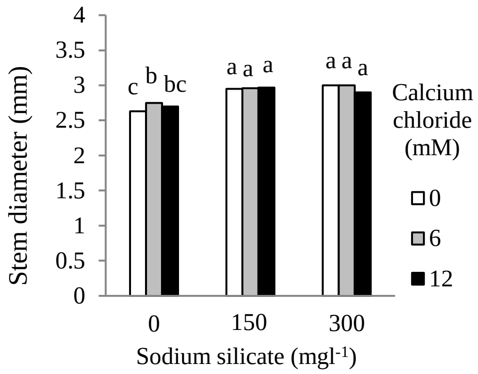
صفت قطر ساقه از نظر تأمین استحکام و پایداری گیاه، مقاومت آن در برابر ورس و نیز برخی از بیماری‌های قارچی حائز اهمیت است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تمامی تیمارها و برهم‌کنش آن‌ها به‌جز اثر اصلی سولفات پتاسیم و اثر متقابل کلرید کلسیم بر سولفات پتاسیم بر قطر ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). در بین ۹ ترکیب تیماری مورد مطالعه حاصل از سطوح مختلف سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم، میزان قطر ساقه بین ۲/۶۳ تا ۳ میلی‌متر متغیر بود. قطر ساقه گیاهان شاهد ۲/۶۳ میلی‌متر بود که در اثر اکثر ترکیبات تیماری به‌طور معنی‌داری بهبود یافت. به‌عنوان مثال مقدار این صفت در گیاهانی که محلول سیلیکات سدیم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر را همراه با کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار دریافت کرده بودند ۳۰/۴۳ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. البته باید توجه داشت که اثر ترکیب دو سطح ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر با هر سه سطح کلرید کلسیم بر صفت قطر ساقه یکسان بود و اختلافی بین آن‌ها وجود نداشت (شکل۵).

قطر ساقه در ترکیب تیماری سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر در حضور و عدم حضور سولفات پتاسیم به‌طور قابل‌توجهی نسبت به شاهد افزایش یافت و همین نتیجه در اثر کاربرد برگی سیلیکات سدیم با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر بدون مصرف سولفات پتاسیم به‌دست آمد (در این شرایط به‌طور متوسط افزایشی حدود ۹/۵ درصدی نسبت به شاهد مشاهده شد). در اثر همراه شدن سولفات پتاسیم با غلظت بالای سیلیکات سدیم، قطر ساقه کمتری ثبت شد هرچند نسبت به شاهد برتری معنی‌داری داشت (شکل ۶). همچنین بررسی اثر سه‌جانبه در این صفت نشان داد که ترکیب تیماری ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم ۱۲ میلی‌مولار در سطح صفر سولفات پتاسیم بهترین ترکیب تیماری برای این صفت است (جدول ۴). کلسیم برای تقسیم سلولی، تشکیل و استحکام دیواره سلولی ضروری است بنابراین کاربرد آن در افزایش قطر و استحکام ساقه به اثبات رسیده است (Khosravi moshizi & Sarcheshmehpur, 2012). سیلیسیم نیز در دیوارهای سلول رسوب می‌کند و با ماکرومولکول‌های آلی (شامل سلولز، پکتین، گلیکوپروتئین‌ها و لیگنین) ترکیب و قطر ساقه را افزایش می‌دهد (Mom rashpour *et al.*, 2018).



شکل ۵- اثر محلول‌پاشی سیلیکات‌سدیم و سولفات‌پتاسیم بر قطر ساقه

Figure 5- The effect of sodium silicate and potassium sulfate foliar application on stem diameter



شکل ٦- اثر محلول‌پاشی سیلیکات‌سدیم و کلریدکلسیم بر قطر ساقه

Figure 6- The effect of sodium silicate and calcium chloride foliar application on stem diameter

ضخامت دیواره ساقه

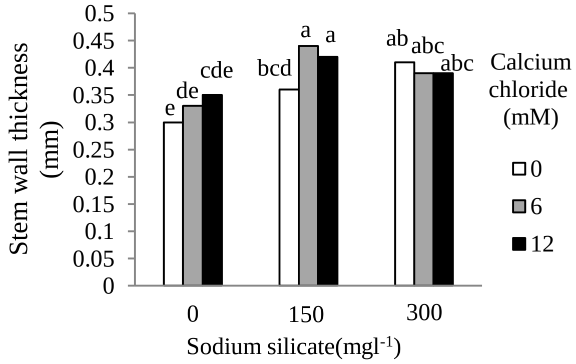
از بین منابع تغییر اثر اصلی کلریدکلسیم و برهم‌کنش سیلیکات سدیم در کلریدکلسیم ($p<۰/۰۱$) بر ضخامت دیواره ساقه معنی‌دار شد (جدول ۲). اثر ترکیبات تیماری حاصل از سیلیکات‌سدیم در کلرید کلسیم بر این صفت در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که مقدار ثبت‌شده برای این صفت در ترکیب محلول‌پاشی سیلیکات سدیم با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر همراه با کلرید کلسیم در هر دو سطح ۶ و ۱۲ میلی‌مولار به‌ترتیب ۴۶/۶۶ و ۴۰ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. به‌طور کلی ضخامت دیواره ساقه جو در اثر محلول‌پاشی سیلیکات‌سدیم در هر دو سطح ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر همراه با هر سه سطح کلرید کلسیم به‌طور معنی‌داری بهبود یافت. ثابت شده است که استحکام بافت‌ها با افزودن کلسیم افزایش می‌یابد. در واقع تشکیل پکتات‌های کلسیم، استحکام تیغه میانی و دیواره سلولی و ضخامت ساقه را افزایش می‌دهد (Khosravi moshizi & Sarcheshmehpur, 2012) همچنین گزارش شده است که کاربرد سیلیس می‌تواند سبب افزایش مقاومت نیشکر به ساقه‌خوارها در اثر افزایش تجمع سیلیکات در بافت‌های برگ و ساقه و در نتیجه افزایش ضخامت بافت‌ها شود (Bakhat *et al.*, 2018).

عملکرد دانه

در غلات دانه‌ای، دانه‌ها قوی‌ترین مقصدهای فیزیولوژیک برای مواد فتوسنتزی هستند (Emam, 2013) و کارایی یک رقم، یک کشت یا تیمار و در نهایت تولید اقتصادی را در زراعت‌هایی با هدف تولید دانه تعیین می‌کنند. بین منابع تغییر در این آزمایش تنها برهم‌کنش سیلیکات سدیم در کلرید کلسیم و سیلیکات سدیم در سولفات پتاسیم در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۲).

ترکیب تیماری سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر و کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار افزایش معنی‌داری را نسبت به سایر تیمارها در عملکرد دانه ایجاد نمود. افزایش مشاهده شده در این تیمار نسبت به

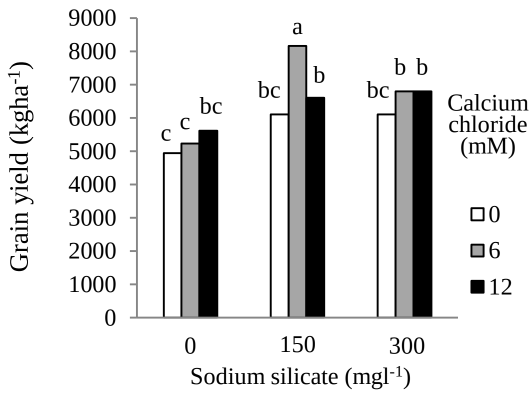
شاهد ۶۵/۱۳ درصد بود. البته افزایش عملکرد حاصل از کاربرد همزمان سیلیکات سدیم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر با دو سطح ۶ و ۱۲ میلی‌مولار کلرید کلسیم و سیلیکات سدیم ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر با کلرید کلسیم ۱۲ میلی‌مولار نیز نسبت به شاهد چشم‌گیر و معنی‌دار بود (شکل ۸).



شکل ۷- اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم بر ضخامت دیواره ساقه

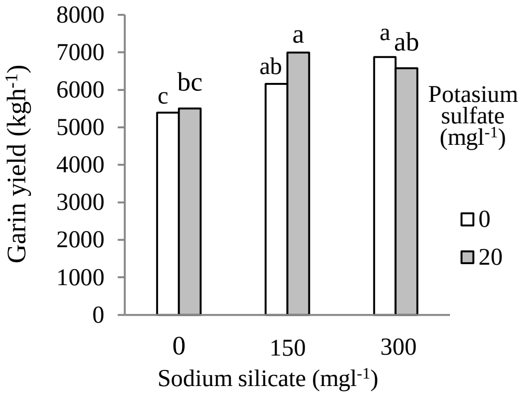
Figure 7- The effect of sodium silicate and calcium chloride foliar application on stem wall thickness

در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود که محلول‌پاشی سولفات پتاسیم به‌تنهایی تأثیری بر عملکرد دانه نداشته است درحالی که همراه شدن آن با سیلیکات سدیم به‌طور معنی‌داری سودمند بود. البته تأثیر آن مشابه با کاربرد سیلیکات سدیم به‌تنهایی در هر دو غلظت ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود و این چهار ترکیب تیماری از نظر تأثیر بر عملکرد دانه در یک گروه آماری قرار گرفتند. سیلیسیم با تأثیر بر سیستم HC-ATPase می‌تواند بر جذب پتاسیم تأثیر مثبت بگذارد که این موضوع ممکن است موجب افزایش و بروز تأثیرات مثبت پتاسیم در حضور سیلسیم باشد. افزایش عملکرد دانه در اثر کاربرد سیلیس به دلیل افزایش محتوای کلروفیل و برگ‌ها و افزایش سطح فعال فتوسنتزی است که در نهایت به بهبود فتوسنتز منجر می‌شود (Yahyaabadi & Asgharipour, 2015). استفاده همزمان ۴ میلی‌مول سیلکون و ۲ میلی‌مول نیترات پتاسیم موجب افزایش عملکرد دانه گندم از طریق افزایش وزن صد دانه شد (Ahmad, 2014). بررسی خسروی مشیزی و سرچشمه پور (Khosravi moshizi & Sarcheshmehpur, 2015) نشان داد که مصرف پتاسیم و روی به‌طور معنی‌داری عملکرد دانه گندم را افزایش می‌دهد. ساموئلز و همکاران (Samuels, Glass, Ehret, & Menzies, 1993) نیز نشان دادند که افزایش رشد و عملکرد گیاه در حضور سیلیسیم از طریق بهبود توانایی مکانیکی ساقه و برگ‌ها در جذب نور و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌باشد.



شکل ۸- اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم وکلرید کلسیم بر عملکرد دانه

Figure 8- The effect of sodium silicate and calcium chloride foliar application on Grain yield



شکل ۹- اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و سولفات پتاسیم بر عملکرد دانه

Figure 9- The effect of sodium silicate and potassium sulfate foliar application on Grain yield

صفات مکانیکی

رفتار مواد کشاورزی در برابر نیروهای خارجی (فشاری، خمشی، برشی، پیچشی یا ترکیبی از آن‌ها) خواص مکانیکی مواد نامیده می‌شود. هرکدام از این خواص خود تابعی از پارامترهای متعدد چون شرایط محیطی و شرایط داخلی ماده مانند بافت، ابعاد، شکل، درجه رسیدگی و غیره است که بر پیچیدگی موضوع می‌افزاید (Rabani, Sohrabi, & Forotanmehr, 2015).

مقاومت خمشی ساقه

اثر اصلی سیلیکات سدیم و اثر متقابل کلرید کلسیم در سولفات پتاسیم در سطح احتمال یک درصد، همچنین اثر اصلی کلرید کلسیم و اثر سه‌جانبه در سطح احتمال پنج درصد بر مقاومت خمشی ساقه جو معنی‌دار شد (جدول ۳).

مقایسه ترکیبات تیماری حاصل از کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم نشان داد که مقاومت خمشی ساقه گیاهانی که سولفات پتاسیم و هر دو غلظت ۶ و ۱۲ میلی‌مولار کلرید کلسیم را با هم دریافت کردند، همچنین گیاهانی که فقط کلرید کلسیم ۱۲ میلی‌مولار را دریافت کردند به‌طور معنی‌داری بیشتر از شاهد بود. سه ترکیب تیماری یادشده این صفت را به‌ترتیب ۷۵، ۶۰ و ۶۲ درصد نسبت به شاهد بهبود بخشیدند (شکل ۱۰).

جدول ۳- میانگین مربعات مقاومت خمشی و برشی ساقه تحت تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم

Table 3- Mean squares of flexural and shear strength of stem under foliar application of sodium silicate, calcium chloride and potassium sulfate

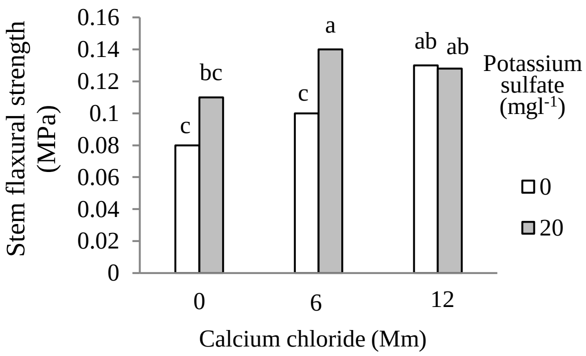
منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f	مقاومت خمشی ساقه Stem flexural strength	مقاومت برشی ساقه Stem shear strength
Repetition تکرار	2	0.013**	1.54
سیلیکات سدیم (a) Sodium silicate	2	0.005**	139.88**
کلرید کلسیم (b) Calcium chloride	2	0.003	36.77
سولفات پتاسیم (c) Potassium sulfate	1	0.001	23.54
a×b	4	0.001	162.02**
a×c	2	0.0003	24.83
b×c	2	0.005**	35.13
a×b×c	4	0.003*	27.28
Error خطا	34	0.00095	21.80
ضریب تغییرات CV (%)		26.7	25.2

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

* and ** are significant at the probability level of 5% and 1%, respectively

بررسی اثرات سه‌جانبه بیانگر تأثیر چشم‌گیر تیمارها در افزایش مقاومت خمشی ساقه بود. مقدار این صفت در گیاهان شاهد که هیچ تیماری دریافت نکرده بودند، بسیار پایین و معادل ۰/۰۳ مگاپاسکال بود. تیمارهای مورد استفاده این صفت را بین ۱۶۶ تا ۵۳۳ درصد افزایش دادند. در نهایت بالاترین میزان مقاومت کششی ساقه در ترکیب تیماری سیلیکات سدیم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر توأم با کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار و سولفات پتاسیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده گردید که البته با همین ترکیب از کلرید کلسیم و و سولفات پتاسیم در سطح ۱۵۰ میلی‌گرم سیلیکات سدیم و ترکیب تیماری سیلیکات سدیم ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در کلرید کلسیم ۱۲ میلی‌مولار در عدم حضور سولفات پتاسیم در یک گروه آماری قرار گرفت (جدول ۴).

با توجه به ویژگی‌های مورفولوژیک بیشتر غلات که سنبله یا خوشه و دانه‌ها در قسمت انتهای ساقه تشکیل می‌شوند، تناسب بین استحکام بخش پایینی بوته و وزن قسمت‌های بالایی آن، تعیین‌کننده میزان مقاومت گیاه نسبت به خوابیدگی است (Kashiwagi *et al.*, 2005; Emam, 2013). مقاومت به خوابیدگی بوته در غلات تحت تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی قرار دارد. در بین صفات مورفولوژیک، قطر ساقه و ضخامت دیواره ساقه به‌طور مستقیم با مقاومت به خوابیدگی و استحکام ساقه در ارتباط هستند (Bromand, Esfahani, Alizadeh, & Alami, 2013). از سوی دیگر، مقاومت ساقه در ارتباط با اجزای تشکیل‌دهنده‌ی شیمیایی و بیوشیمیایی آن نیز می‌باشد (Faraji, Esfahani, Alizadeh, & Alami, 2016). محتوای کربوهیدرات‌های ساقه و محتوای بالاتر سیلیسیم آن با مقاومت بیشتر بوته‌ها به خوابیدگی همراه است و تجمع بیشتر نشاسته، سلولز، لیگنین، سیلیسیم، کلسیم و پتاسیم، استحکام و مقاومت ساقه را در برابرخوابیدگی افزایش می‌دهند (Zhang *et al.*, 2013). نتایج بررسی فرجی و همکاران (Faraji *et al.*, 2016) نشان داد که افزایش غلظت سیلیسیم مورد استفاده در برنج رقم نعمت با افزایش قطر و ضخامت ساقه موجب افزایش گشتاور و مقاومت خمشی ساقه برنج گردید که با کاهش شاخص خوابیدگی بوته همراه بود. سیلیس در برنج با افزایش نشاسته در ساقه موجب بالا بردن مقاومت ساقه و مقاومت بیشتر به خمش می‌شود (Lennon, Ho-Baillie, & Wenham, 2009). همچنین بیان شده است سیلیس به دلیل اثراتی که بر افزایش میزان لیگنین در ساقه گیاه برنج دارد سبب افزایش مقاومت خمشی و کاهش ورس در برنج می‌گردد (Liang, Chen, Liu, Zhang, & Ding, 2003).



شکل ۱۰- اثر محلول‌پاشی کلسیم کلرید و سولفات پتاسیم بر مقاومت خمشی ساقه

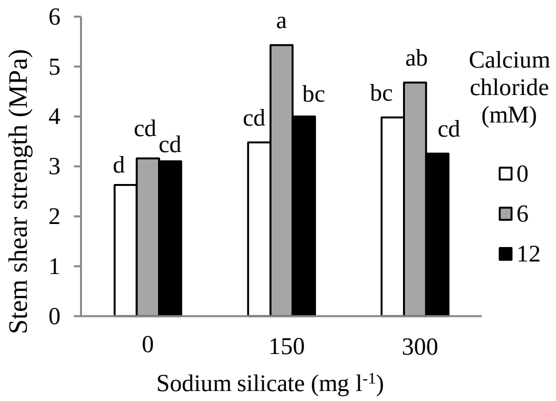
Figure 10- The effect of calcium chloride and potassium sulfate foliar application on the stem flexural strength

مقاومت برشی ساقه

فرآیند برش مشتمل بر یک رشته از برش‌های اصلی، تغییرشکل‌ها با روش‌های گسیختگی است که هر کدام با اصول متفاوتی به‌وقوع می‌پیوندند. در برش فلزات مقدار کار انجام شده مستقیماً با سطح مقطع صفحه متناسب است، ولی در گیاهان به‌علت ساختار فیبری مقدار کار انجام‌شده به عوامل مختلفی نظیر نوع گیاه، محتوای رطوبتی گیاه، قطر و ضخامت گیاه، مواد جامد واقع در گیاه، عوامل مربوط به طراحی ماشین‌آلات برشی و غیره بستگی دارد (Rabani *et al.*, 2015).

اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و برهم‌کنش آن با کلرید کلسیم بر مقاومت برشی ساقه معنی‌دار شد ($p < 0.01$) (جدول ۳). در بین ترکیبات تیماری مورد مطالعه مقاومت برشی ساقه جو بین ۲/۶۳ تا ۵/۴۳ مگاپاسکال متغیر بود. گیاهانی که با سیلیکات سدیم در هر دو غلظت ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در حضور کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار محلول‌پاشی شدند از مقاومت برشی بالاتری نسبت به سایر تیمارها برخوردار بودند به‌طور مشخص کاربرد توأم سیلیکات سدیم

۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر با کلرید کلسیم ۶ میلی‌مولار این صفت را ۱۰۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۱۱). نتایج تحقیقات فرجی و همکاران (Faraji *et al.*, 2016) حاکی از آن است که صفات مقاومت فیزیکی ساقه به‌طور مستقیم با عناصر موجود در ساقه در ارتباط است و افزایش این عناصر که شامل سیلیسیم هم می‌شود در افزایش مقاومت فیزیکی ساقه نقش مؤثری دارد. کریشنارو و گودخیندی (Krishnarao & Godkhindi, 1992) گزارش دادند، کاربرد سیلیس در برنج موجب افزایش معنی‌داری در مقاومت به برش نسبت به شاهد شد.



شکل ۱۱- اثر محلول‌پاشی سیلیکات سدیم و کلسیم کلرید بر مقاومت برشی ساقه

Figure 11- The effect of sodium silicate and calcium chloride foliar application on stem shear strength

جدول ٤- مقایسه میانگین وزن خشک ساقه و غلاف، قطر ساقه و مقاومت خمشی ساقه تحت تأثیر برهم‌کنش سه‌جانبه محلول‌پاشی سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم

Table 4 - Mean comparison for stem and sheath dry matter, stem diameter, and stem flexural strength affected by the interaction of foliar application of sodium silicate, calcium chloride, and potassium sulfate

Treatments تیمارها			**Mean values of measured properties مقادیر میانگین صفات اندازه‌گیری‌شده**			
سیلیکات سدیم Sodium silicate (mgl^{-1})	کلرید کلسیم Calcium chloride (mM)	سولفات پتاسیم Potassium sulfate (mgl^{-1})	ماده خشک ساقه Stem dry matter (gm^{-2})	ماده خشک غلاف Sheath dry matter (gm^{-2})	قطر ساقه Stem diameter (mm)	مقاومت خمشی ساقه Stem Flexural strength (MPa)
zero	Zero	zero	338.20^{hi}	75.17^{f}	2.63^{j}	0.03^{e}
		20	1098.00^{ab}	164.0^{1ab}	3.01^{efgh}	0.10^{cd}
	6	zero	1041.00^{abc}	159.20^{abc}	2.96^{fgh}	0.11b^{cd}
		20	681.60^{def}	96.22^{def}	3.02^{efgh}	0.10^{cd}
	12	zero	449.20^{gh}	175.90^{ab}	2.59^{j}	0.10^{cd}
		20	889.80^{bcd}	141.20^{bcde}	2.90^{hi}	0.10^{cd}
150	Zero	zero	875.10^{cde}	211.20^{a}	3.15^{de}	0.11b^{cd}
		20	200.40^{i}	94.57^{ef}	2.75^{ij}	0.08^{cd}
	6	zero	645.30^{fg}	134.90^{bcde}	3.08^{defg}	0.12^{bcd}
		20	1147.00^{a}	164.50^{ab}	2.92^{gh}	0.14^{abc}
	12	zero	735.80^{def}	138.10^{bcde}	2.75^{ij}	0.10^{cd}
		20	1038.00^{ac}	108.40^{cdef}	3.19^{d}	0.11^{bcd}
300	Zero	zero	546.30^{fgh}	173.50^{ab}	3.09^{def}	0.11^{bcd}
		20	626.00^{fg}	150.50^{bcd}	3.07^{defg}	0.116^{bcd}
	6	zero	893.10^{bcd}	105.70^{cdef}	3.56^{b}	0.119^{bcd}
		20	702.90^{def}	149.10^{bcd}	3.05^{d-h}	0.19^{a}
	12	zero	1098.00^{ab}	160.40^{ab}	3.98^{a}	0.16^{ab}
		20	666.20^{ef}	144.20^{bcde}	3.37^{c}	0.099^{cd}

حروف غیر مشترک در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است.

Non-common letters in each column indicate a significant difference

در مطالعه این محققین بالاترین مقاومت به برش در سطح ۵۰۰ کیلوگرم سیلیکات کلسیم گزارش شده است. همچنین در آزمایشی که با مقادیر مختلف سیلیس روی گیاه برنج و گندم انجام شده اعلام گردید که کاربرد سیلیس می‌تواند مقاومت به برش را نسبت به تیمار شاهد افزایش دهد (Acreche & Slafer, 2011).

نتیجه‌گیری

بررسی تیمارهای آزمایش شامل محلول‌پاشی سیلیکات سدیم، کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم و برآیند نتایج حاصل از آن‌ها نشان داد که اعمال این تیمارها بر بسیاری از صفات زراعی و فیزیولوژیک تأثیر مثبت داشت. به‌عنوان مثال هنگامی که سیلیکات سدیم به همراه کلرید کلسیم روی بوته‌های جو محلول‌پاشی شدند، صفاتی مانند مقدار ماده خشک ساقه، قطر و ضخامت دیواره ساقه، عملکرد دانه و مقاومت برشی ساقه بهبود یافتند. این تأثیر در سطح ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم و ۶ میلی‌مولار کلرید کلسیم بیشتر بود به‌طوری که عملکرد دانه جو نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان داد.

کاربرد همزمان کلرید کلسیم و سولفات پتاسیم موجب افزایش مقاومت خمشی گردید. این تأثیر در غلظت‌های ۶ و ۱۲ میلی‌مولار کلرید کلسیم و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات پتاسیم بیشتر بود، و موجب افزایش چشم‌گیر (۶۵ درصد) مقاومت خمشی ساقه نسبت به شاهد گردید. همچنین محلول‌پاشی توأم سیلیکات سدیم و سولفات پتاسیم موجب بهبود عملکرد دانه شد. این تیمار از غلظت ۲۰ میلی‌گرم سولفات پتاسیم و به‌طور کلی غلظت‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم بیشترین تأثیر را پذیرفت. در نهایت بررسی تأثیر سه‌جانبه تیمارها نشان داد که ترکیب تیماری حاصل از محلول‌پاشی سطوح ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم، ۶ و ۱۲ میلی‌مولار کلرید کلسیم بدون حضور سولفات پتاسیم بیشترین تأثیر را بر مقاومت خمشی و قطر ساقه داشت.

References

1. Acreche, M. M., & Slafer, G. A. (2011). Lodging yield penalties as affected by breeding in Mediterranean wheats. *Field Crops Research*, *122*(1), 40-48. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.02.004
2. Ahmad, B. (2014). Interactive effects of silicon and potassium nitrate in improving salt tolerance of wheat. *Journal of Integrative Agriculture*, *13*(9), 1889-1899. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60639-5
3. Anten, N. P., Casado-Garcia, R., Pierik, R., & Pons, T. L. (2006). Ethylene sensitivity affects changes in growth patterns, but not stem properties, in response to mechanical stress in tobacco. *Physiologia Plantarum*, *128*(2), 274-282 https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00736.x
4. Asadi Nasab, N., Nabipour, M., Roshanfekr, H., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2018). Effect of Calcium Chloride Application Time on Reducing the Effects of Heat Exhaustion on Yield and Yield Components of Wheat in Ahvaz. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *16*(4), 833-846. (in Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v16i4.71018
5. Asadi, A. Haqqania, M., Lekzian, A. & Mafotun, M. (2013). The effect of different amounts of silicon and nitrogen on morphological characteristics, performance and yield components of two wheat cultivars. *Journal of Agriculture*, *103*(4), 66-78. (in Persian). https://doi.org/10.22092/aj.2014.101218.
6. Bakhat, H. F., Bibi, N., Zia, Z., Abbas, S., Hammad, H. M., Fahad, S., Ashraf, M. R., Shah, G. M., Rabbani, F., & Saeed, S. (2018). Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: a review. *Crop Protection*, *104*, 21-34. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008
7. Bromand, M., Esfahani, M., Alizadeh, M. R. & Alami, A. (2013). Evaluation of morphological traits related to plant dormancy in native and modified rice cultivars (*Oryza sativa* L.). *Journal of Cereal Research*, *3*(3), 181-195. (in Persian). https://doi.org/10.22034/saps.2021.44978.2650.
8. Crook, M., & Ennos, A. (1995). The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat. *Journal of Experimental Botany*, *46*(8), 931-938. https://doi.org/10.1093/jxb/46.8.931.
9. Emam, Y. (2013). *Cereal Crops*. Iranian University Press.190 P. in Persian.
10. Faraji, F., Esfahani, M., Alizadeh, M. R. & Alami, A. (2016). Evaluation of the effect of stem morphological and physiological characteristics on the dormancy of 12 rice genotypes. *Journal of Crop Improv*, *18*(1), 183-201. (in Persian). https://doi.org/10.22059/jci.2016.56557
11. Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO). (2016). FAO report on world cereal status in 2016. Retrieved from http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/
12. Gere, J. M., & Timoshenko, S. (1997). Mechanics of Materials. ed. *Boston, MA: PWS*.
13. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., & Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant science*, *169*(2), 313-321. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023

14. Ibrahim, M., Faisal, A., & Shehata, S. (2016). Calcium chloride alleviates water stress in sunflower plants through modifying some physio-biochemical parameters. *American-Eurasian J Agric Environ Sci*, *16*(4), 677-693. https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2016.16.4.12907
15. Jafardokht, R., Mousvinik, M., Mehraban, A., & Basiri, M. (2015). The effect of drought stress and foliar application of low consumption elements on physiological characteristics and Absorption of nutrients in mung bean plant. *Agricultural Plant Production Journal*, *8*(1), 121-141. (in Persian). https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1394.8.1.7.7
16. Jamshidi, P., Baradaran Firoozabadi, M., Oloumi, H., & Naghavi, H. (2017). Evaluation of Foliar Spraying of Zinc and Calcium Fertilizers on Yield and Physiological Traits of Safflower under Lead Stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *15*(2), 368-379. (in Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v15i2.51279
17. Ju, S., Wang, L., & Chen, J. (2020). Effects of silicon on the growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure of Oryza sativa L. seedlings under acid rain stress. *Silicon*, *12*, 655-664. https://doi.org/10.1007/s12633-019-00176-8
18. Kashiwagi, T., Sasaki, H., & Ishimaru, K. (2005). Factors responsible for decreasing sturdiness of the lower part in lodging of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, *8*(2), 166-172. https://doi.org/10.1626/pps.8.166
19. Khaje pur, M. R. (2011). *Principles and bases of agriculture*. Isfahan University of Technology Jahad, 398 pages. (in Persian).
20. Khodabande, **N**. (2014). *Cereals*. University of Tehran Press, 506 pages. (in Persian).
21. Khosravi moshizi, M. & Sarcheshmehpur, M**. (**2015). The effect of calcium and potassium solution spraying on plant growth, yield and post-harvest characteristics (*Cucumis melo* L.) Fruit harvesting of two melon varieties. *Journal of Production and Processing of Agricultural and Horticultural Products*, *5*(17), 295-310. (in Persian). https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.5.17.295.
22. Khalifa, R. K. M., Omaima, M. H., & Abd-El-Khair, H. (2009). Influence of foliar spraying with boron and calcium on productivity, fruit quality, nutritional status and controlling of blossom end rot disease of Anna apple trees. *World Journal of Agricultural Sciences*, *5*(2), 237-249.
23. Kouchaki, A. & Khajeh Hosseini, M. (2017). *Modern agriculture*. Publications of Jihad University of Mashhad. Mashhad, 550 pages. (in Persian).
24. Krishnarao, R., & Godkhindi, M. (1992). Distribution of silica in rice husks and its effect on the formation of silicon carbide. *Ceramics international*, *18*(4), 243-249. https://doi.org/10.1016/0272-8842(92)90102-J
25. Lennon, A. J., Ho-Baillie, A. W., & Wenham, S. R. (2009). Direct patterned etching of silicon dioxide and silicon nitride dielectric layers by inkjet printing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *93*(10), 1865-1874. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.028
26. Liang, Y., Chen, Q., Liu, Q., Zhang, W., & Ding, R. (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*, *160*(10), 1157-1164. https://doi.org/10.1078/0176-1617-01065
27. Ma, J. F. (2010). Silicon transporters in higher plants. *MIPs and their role in the exchange of metalloids*, 99-109. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6315-4_8
28. Madanipour, E., Asilan, K., & Mansourifar, S. (2017). The effect of hexaconazole, penconazole and calcium silicate on the quantitative and qualitative traits of two varieties of soybean under water deficit conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *48*(2). (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.133422.653957
29. Mam Rashpour, O., & Nazari Deljoo, M. J. (2019). Persistence and physiological response of cut flowers of Lilium Oriental to the semi-essential element silicon in soilless cultivation. *Horticultural Sciences of Iran, 50*(1), 74-89. (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.243479.1330
30. Mehdinjad, N., Jamalpour, H., Fakheri, B. & Khajeh, M. (2019). Investigating the response of some physiological characteristics and seed yield of purslane cultivarsto drought stress and foliar application of nano iron chelate (*Portulaca oleracea* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*, *14*(54), 74-89. (in Persian). https://dorl.net/dor/20.1001.1.76712423.1398.14.54.7.7.
31. Mom rashpour, O., Nazari deljoo, M. J. & Haghshenas, M. (2018). Responses of growth and development, yield and quality of greenhouse cucumber to silicon foliar application. *Science and Techniques of Greenhouse Crops, 9*(3), 13-21. in Persian. https://doi.org/10.29252/ejgcst.9.3.13
32. Nomura, T., Ohkubo, S., Nagano, A. J., Samadi, A. F., Adachi, S., & Ookawa, T. (2022). Physiological and morphological factors affecting leaf sheath reinforcement and their contribution to lodging resistance in rice. *Plant Production Science*, 1-17. https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2160362
33. Pinthus, M. J. (1974). Lodging in wheat, barley, and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures. *Advances in Agronomy*, *25*, 209-263. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60782-8
34. Porabolghasem, M., & Ghazanfari Moghadam, A. (2021). Measuring Mechanical Properties and Simulating the Creep Behavior of Wild Cane Stem using Burger-Voigt Model. *Journal of Agricultural Machinery, 11*(2), 385-397. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.80688
35. Qazvini, H., Yousefi, A. & Saeedi, A. (2002). Joe Rihan; Suitable for cultivation in temperate regions of the

country. *Seed and Plant Breeding Research Institute*, 27-32. (in Persian).
36. Rabani, H., Sohrabi, N. & Forotanmehr, A. (2015). Determining the shear energy of green bean (*Phaseolous vulgaris*). *Journal of Agricultural Mechanization*, *2*(2), 26-30. (in Persian).
37. Sadeghi Lotfabadi, S., Kafi, M., & Khazai, H. (2011). Investigating the modulating effects of soil application and foliar application of potassium chloride and calcium chloride on morphological and physiological traits of sorghum plant under salinity stress conditions. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, *24*(2), 385-393. (in Persian). https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.3255
38. Samuels, A., Glass, A., Ehret, D., & Menzies, J. (1993). The effects of silicon supplementation on cucumber fruit: changes in surface characteristics. *Annals of Botany*, *72*(5), 433-440. https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1129
39. Sedghi, M., & Seyed Sharifi, R. (2013). Effects of foliar supplements of nitrogen, phosphorus and potassium on grain yield and macro element transport and adsorption efficiency of hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Research in Field Crop Journal*, *1*(1), 64-75. (in Persian).
40. Sharbatkhari, M., Shobbar, Z.-S., Galeshi, S., & Nakhoda, B. (2016). Wheat stem reserves and salinity tolerance: molecular dissection of fructan biosynthesis and remobilization to grains. *Planta*, *244*(1), 191-202. https://doi.org/10.1007/s00425-016-2497-3
41. Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Sakran, A. M., Basalah, M. O., & Ali, H. M. (2012). Effect of calcium and potassium on antioxidant system of *Vicia faba* L. under cadmium stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *13*(6), 6604-6619. https://doi.org/10.3390/ijms13066604
42. Stapper, M., & Fischer, R. (1990). Genotype, sowing date and plant spacing influence on high-yielding irrigated wheat in southern New South Wales. II. Growth, yield and nitrogen use. *Australian Journal of Agricultural Research*, *41*(6), 1021-1041. https://doi.org/10.1071/AR9901021
43. Yahyaabadi, H., & Asgharipour, M. R. (2015). Effect of silicon foliar application on yield and some physio-chemical properties of fennel under limited irrigation. *Journal of Crops Improvement*, *17*(4). (in Persian).
44. Zhang, Q., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Wang, W., Du, J., & Duan, H. (2013). Silicon alleviates cadmium toxicity in Avicennia marina (Forsk.) Vierh. seedlings in relation to root anatomy and radial oxygen loss. *Marine pollution bulletin*, *76*(1-2), 187-193. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.09.005